УДК 621.311.6

МАССОГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ В ФУНКЦИИ ОТ РАБОЧЕЙ ГЛУБИНЫ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов*

Томский политехнический университет
*ГНУ НИИ Автоматики и электромеханики при ТУСУР
E-mail: rulevsky@mail.ru

Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследований влияния структуры и элементов системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также способа передачи энергии по кабель-тросу на массогабаритные характеристики системы в функции от рабочей глубины.

Геологические, спасательные и технические работы под водой на довольно больших глубинах (от 100 до 6000 м) обусловили необходимость развития класса многофункциональных телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА). Проблема создания эффективных и высоконадежных глубоководных ТПА в значительной степени связана [1, 2] с оптимизацией сопряжения информационного и энергетического каналов передачи энергии по единому кабель-тросу и с надежностью обеспечения стабилизации напряжений на потребляющих нагрузках и т.д.

Данная работа решает задачу выбора структуры и элементов системы электропитания (СЭП) ТПА, а также обосновывает её массогабаритные характеристики в функции от рабочей глубины аппарата с учетом требований по выбору СЭП ТПА: высокой надежности, времени непрерывной работы; малых размеров и массы; величины передаваемой мощности; легкости замены модулей СЭП.

Все СЭП условно делятся на две группы, в зависимости от места расположения первичного источника электроэнергии: с автономным источником

электроэнергии на ТПА и подключенные к электрической сети обеспечивающего судна.

СЭП с автономным источником электроэнергии на борту ТПА в настоящее время не являются перспективными в силу ряда недостатков, а именно: ограниченное время работы, определяемое емкостью аккумуляторов; значительные массогабаритные параметры; усиленный износ кабель-троса, из-за частых подъемов-спусков ТПА для замены и подзаряда аккумуляторов и т.д. Данные системы в дальнейшем рассматриваться не будут в силу вышеуказанных недостатков.

Системы электропитания ТПА подключенные к сети обеспечивающего судна делят на две группы, в зависимости от передачи электроэнергии по кабель-тросу: системы электропитания на переменном токе и постоянном токе [3].

Структурная схема комплекса СЭП телеуправляемого подводного аппарата, подключенного к сети обеспечивающего судна, представлена на рис. 1.

СЭП ТПА условно состоит из двух частей: системы электропитания судовой части (СЧ) и подводной части (ПЧ). СЭП СЧ расположена на борту обеспечивающего судна, вход которой подключен к судовой сети и которая на современных судах выполняется трехфазной, напряжением 380 В частотой 50 Гц, а с выхода напряжение передается по кабель-тросу на СЭП ПЧ, которая расположена на заглубителе и ТПА.

В современных системах подводного оборудования с дистанционным управлением используются в качестве составной части подводного оборудования заглубители, в которых может размещаться телеуправляемый подводный аппарат при его доставке на глубину, и с которым подводный аппарат может соединяться относительно коротким и легким плавучим кабелем. При этом повышается маневренность подводного аппарата, поскольку он не связан с длинным и тяжелым кабель-тросом. Заглубитель в своем составе имеет кабину для размещения подводного аппарата, лебедку с барабаном плавучего кабеля с системой, управляющей длиной свободного плавучего кабеля между заглубителем и подводным аппаратом. Заглубитель также позволяет установить на нем часть блоков системы электроснабжения и управления, при этом освобождается дополнительное, полезное пространство на ТПА и снижается его вес.

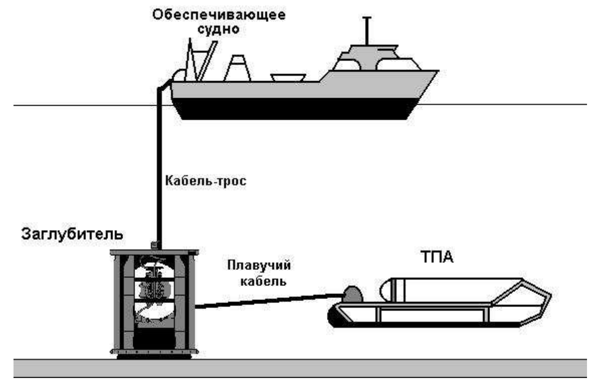


Рис. 1. Структурная схема комплекса СЭП ТПА

Обзор характеристик этого типа СЭП в зависимости от рабочей глубины показал, что все ТПА можно разделить на три группы:

1. Малых глубин 150...300 м, с выходной мощностью до 2 кВт.
2. Средних глубин 300...1000 м, до 10 кВт.
3. Глубоководные 1000...6000 м, до 70 кВт.

Для определения наилучших массогабаритных характеристик СЭП в функции от рабочей глубины ТПА рассмотрим и сравним построение систем на переменном и постоянном токе.

Рассмотрим вариант СЭП на переменном токе, структурная схема и работа, которой была рассмотрена ранее [3. С. 120–123, рис. 2].

Судовая часть системы электропитания состоит из входного выпрямителя с фильтром, инвертора, повышающего трансформатора и аппаратуры высокочастотной связи. Подводная часть состоит из понижающего трансформатора, выпрямителя с фильтром и аппаратуры высокочастотной связи.

Для уменьшения массы, габаритов СЭП и передачи большой мощности (свыше 20 кВт) на максимальную глубину до 6000 м, следует электрическую энергию передавать повышенным напряжением на повышенной частоте.

С точки зрения габаритов и массы непосредственно ПЧ СЭП, увеличение частоты питающего напряжения ведет к уменьшению ее массы и габаритов по экспоненциальному закону. Определяющими габариты системы электропитания в основном являются моточные элементы системы и с увеличением частоты массогабаритные показатели трансформаторов и дросселей существенно улучшаются. Это связано с тем, что ЭДС E, наводимая в обмотках трансформатора, имеет зависимость [4]:

$$E = 4k_{ф} w f B_m S, \qquad (1)$$

где $k_ф$ – коэффициент формы напряжения; w – число витков обмотки; f – частота преобразования; B_m – амплитуда индукции; S – сечение сердечника.

Из (1) следует, что с увеличением частоты преобразования f, при неизменной величине ЭДС E необходимо уменьшать либо число витков w, либо индукцию B_m, либо сечение сердечника S. В любом случае это приводит к снижению массы и габаритов всего трансформатора. Однако, учитывая, что потери в стали пропорциональны частоте в степени 1,3, а индукции – в квадрате, то для исключения перегрева трансформатора приходится снижать индукцию с ростом частоты приблизительно по закону [4]:

$$B \equiv 1 / f^{0,65}.$$

В связи с этим приведенная масса трансформатора к единице мощности m с увеличением частоты f сначала снижается быстро, затем значительно медленнее, а после достижения оптимального значения частоты масса снова начинает возрастать из-за увеличения потерь.

На рис. 2 представлена зависимость приведенной массы трансформатора к единице мощности m, с сердечником из электротехнической стали Э3425 (толщина ленты 0,08 мм), от частоты питающего напряжения, которая была получена экспериментально в НИИ АЭМ. Из рис. 2 следует, что оптимальное значение частоты для трансформатора находится в диапазоне 0,5...6,0 кГц.

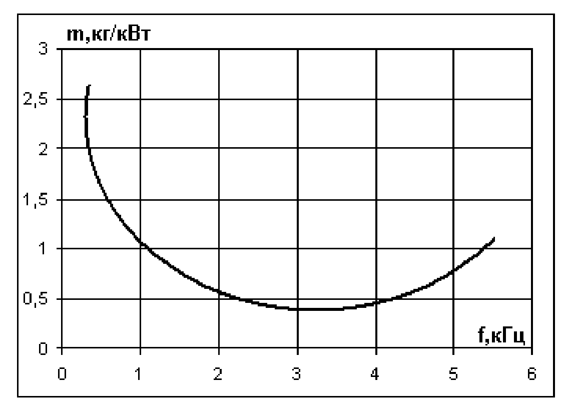


Рис. 2. *Зависимость приведенной массы трансформатора от частоты питающего напряжения*

Увеличение напряжения и частоты тока в кабель-тросе ведет к возрастанию емкостной составляющей тока кабеля, дополнительно нагружающего силовые жилы, что приводит к дополнительным потерям и уменьшает полезную нагрузку. С другой стороны, увеличение напряжения ведет к уменьшению составляющей величины тока, зависящего от полезной мощности ТПА. Поэтому существует оптимальное соотношение, связывающее величины напряжения и частоты, при которых масса и стоимость СЭП, включая стоимость кабеля, минимальна.

К электрическим параметрам кабель-троса, определяющим характеристики СЭП ТПА, относятся: номинальная величина напряжения ($U_н$) и тока силовых жил ($I_{нж}$); погонные величины активного сопротивления силовых жил ($R_п$), емкости силовых жил ($C_п$) и сопротивления изоляции силовых жил ($R_{п.из}$).

Номинальная величина напряжения кабель-троса определяет необходимую величину токовой нагрузки, зависящую от суммарной мощности нагрузок ТПА и потерь в кабель-тросе.

Ток в кабель-тросе можно определить как [2]:

$$I_к = \frac{\sqrt{3}U_н}{6R_ж}(1 - \sqrt{(1 - 4R_ж \cdot P / U_н^2)}),$$

где $R_ж = R_п l$ – активное сопротивление силовой жилы кабель-троса; P – суммарная мощность нагрузок ТПА; l – длина кабеля.

С другой стороны, активное сопротивление жилы кабель-троса зависит от длины, допустимой плотности и величины тока и может быть определено как:

$$R_ж = \frac{\rho \cdot 10^3 \cdot l \cdot j}{I_к}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала жилы; j – плотность тока.

С учетом (2) ток в кабель-тросе соответствует выражению:

$$I_к = \frac{P}{\sqrt{3}U_н - 3 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot j \cdot l}, \quad (3)$$

откуда следует, что для заданной длины кабель-троса ток определяется лишь напряжением, поскольку уменьшать ток за счет снижения плотности тока вряд ли целесообразно, так как будет возрастать диаметр кабель-троса и его стоимость.

Мощность судовой части СЭП в соответствии с выражениями (2) и (3) определяется по выражению:

$$P_{СЧ} = \frac{\sqrt{3}U_н P}{\sqrt{3}U_н - 3 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot j \cdot l}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4), следует выбирать максимальную величину напряжения в кабель-тросе, имея в виду ограничения, накладываемые возможностями токоперехода, условиями техники безопасности и существующей технологией изготовления кабель-тросов.

Влияние емкости кабеля, как отмечалось ранее, проявляется в дополнительной нагрузке жил кабеля и СЧ СЭП емкостным током, что приведет к росту потерь, а также массе и габаритов.

Компенсация емкостного тока возможна с помощью линейных дросселей, устанавливаемых на выходе СЧ СЭП и на заглубителе. При этом судовая часть СЭП емкостной составляющей тока кабеля нагружена не будет. Если дроссели расположить непосредственно на барабане (вьюшке) лебедки спускоподъемного устройства, расположенного на борту обеспечивающего судна, то будет разгружен по емкостному току и токопереход.

Согласно [5], при напряжении 2,5...3,5 кВ, номинальном токе 8...10 А и фторопластовой изоляции трехфазный кабель марки А50079, разрез которого представлен на рис. 3, будет иметь погонную емкость 0,06...0,07 мкФ/км, что при длине кабеля 6 км даст величину емкости 0,36...0,42 мкФ. Данная величина емкости приведет к увеличению эффективного значения тока в жилах кабеля при установке дросселей компенсации:

- в СЧ СЭП и ТПА не более чем в 1,1 раза, т.е. не более чем на 10 %;
- только в СЧ не более чем в 1,3 раза или на 30 %.

В таблице приведены расчетные номинальные значения мощности судовой части СЭП, линейного тока нагрузки, плотности тока, минимально возможные диаметры и массы кабеля под броней от величины линейного напряжения на передающем конце (напряжение на выходе СЧ СЭП) при различных значениях сечения токопроводящих жил для длины кабель-троса 6 км и обеспечении мощности в 30 кВт на токоприемниках ТПА [4].

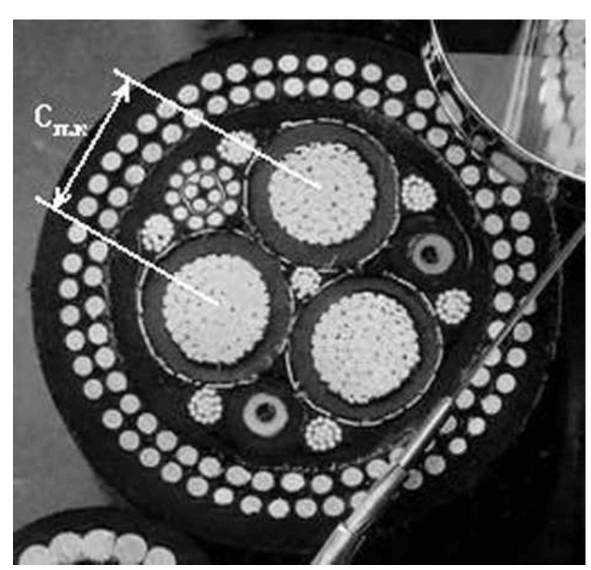


Рис. 3. *Разрез кабель-троса марки А50079*

Таблица. *Параметры кабель-троса марки А50079 в зависимости от величины линейного напряжения на передающем конце при различных значениях сечения токопроводящих жил*

Параметры	Сечения токопроводящих жил, мм²								
	1,5			2,0			2,5		
	Напряжение ЛЭП (линейное), В								
	6000	4500	3500	5000	3500	3000	4500	3500	3000
$I_{л\,ном}$, А	3,5	5,1	8,1	4,2	6,9	9,6	4,7	6,5	8,3
$j_{ном}$, А/мм²	2,33	3,4	5,4	2,1	3,45	4,8	1,9	2,6	3,3
$P_{СЧ\,ном}$, кВт	36,4	39,8	49,1	36,5	41,9	49,9	36,6	39,4	43,1
Диаметр кабеля под броней, мм	26	25	23	27	25	24	27,5	25	24
Масса, кг/км	145	125	110	210	195	180	320	290	280

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что при сечении жил кабеля 1,5 мм² необходимо увеличивать напряжение на (5...6) кВ, либо форсировать плотность тока и увеличивать в 1,5 раза (по сравнению с мощностью нагрузок в ТПА) мощность преобразователей СЧ СЭП, чтобы обеспечить мощность в 30 кВт на токоприемниках ТПА. В этом случае масса и габариты кабель-троса будут минимальны, но при этом возникают трудности токоперехода, обусловленные техникой безопасности, между СЧ СЭП – кабель-тросом и кабель-тросом – ПЧ СЭП. Наиболее оптимальным вариантом является использование кабель-троса с сечением жил 2,0 мм² при напряжении кабель-троса 3,5 кВ. Габариты кабель-троса остаются минимальными, а масса незначительно увеличивается и не возникает трудностей с токопереходом между СЧ – кабель-тросом и кабель-тросом – ПЧ СЭП.

Для максимального снижения массы и габаритов подводной части СЭП целесообразно выпрямитель с фильтром размещать в герметичном модуле и поместить его в бак с трансформаторным маслом, где будет находиться согласующий трансформатор, что, обеспечит эффективное охлаждение при относительно малой поверхности охлаждения. Использование масляного охлаждения и повышения частоты до 650 Гц ведет к снижению массы и габаритов, а также увеличению мощности в 3...5 раз. Таким образом, трансформатор с номинальной мощностью 30 кВт будет иметь массу и габариты трансформатора мощностью 5 кВт, работающего на частоте 50 Гц в условиях естественного воздушного охлаждения.

Расчеты показывают, что массогабаритные параметры ПЧ СЭП на переменном токе, а именно части размещаемой на борту ТПА будут не хуже: масса (32...35) кг; объем (11...15) дм³; габариты (∅×H, 200×400) мм [4].

Рассмотрим для сравнения вариант выполнения СЭП на постоянном токе, структурная схема и работа, которой была рассмотрена ранее [3. С. 120–123, рис. 3], с выходной мощностью и предельной рабочей глубиной работы, как и для системы электропитания на переменном токе.

Судовая часть системы электропитания ТПА выполнена со звеном повышенной частоты, которая представлена блоками регулируемого автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения, которое с выхода согласующего трансформатора поступает на вход выпрямителя. Подводная часть СЭП также представлена со звеном повышенной частоты, что обеспечивает хорошие массогабаритные характеристики системы.

С целью дальнейшего улучшения массогабаритных характеристик СЧ СЭП можно выполнить по схеме с вольтодобавкой. Данная система с вольтодобавочным устройством позволяет уменьшить мощность согласующего трансформатора и величину пульсаций на входе в кабель-трос.

Так же как и в системе электропитания ТПА на переменном токе для передачи мощности в 30 кВт на борт ТПА и уменьшения массы кабель-троса за счет уменьшения сечения жилы, необходимо электрическую энергию передавать повышенным напряжением. Исходя из проведенных расчетов и опыта предыдущих разработок для получения на токоприемниках подводного аппарата ряда стандартных напряжений постоянного тока 550, 220 и 27 В, необходимо на передающем конце кабеля обеспечить напряжение минимум 2400 В. Отсюда возникает трудность в предэксплутационной настройки и реализации входного инвертора ПЧ СЭП, т.к. для его построения необходимо применение высоковольтной полупроводниковой базы, способной работать на высокой частоте преобразования для обеспечения хороших массогабаритных характеристик системы.

Для устранения недостатка связанного с построением инвертора подводной части на высокое напряжение, необходимо его изготавливать путем последовательного соединения трех или более инверторов, как показано на рис. 4, для деления входного напряжения. Данный способ позволяет использо-

вать низковольтную элементную базу, но вместе с тем усложняется конструкция, настройка и резко ухудшаются массогабаритные показатели системы.

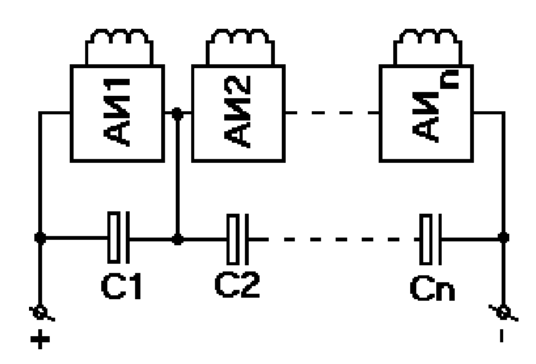


Рис. 4. *Схема соединения инверторов*

Расчеты показывают, что массогабаритные параметры ПЧ СЭП на постоянном токе мощностью 30 кВт, а именно части размещаемой на борту ТПА будут не хуже: масса (45...50) кг; объем (15...20) дм^3; габариты (∅×Н, 300×500) мм [4].

Исходя из сравнительного анализа массогабаритных показателей СЭП в функции от рабочей глубины телеуправляемого подводного аппарата, можно сделать следующие выводы:

1. При работе на большой глубине (до 6000 м) и передачи электрической энергии (до 30 кВт) на борт ТПА целесообразно СЭП выполнять на переменном токе, что обеспечивает малое сечение кабель-троса за счет передачи энергии высоким трехфазным напряжением; простоту конструкции подводной части системы электропитания; высокую надежность; низкую стоимость и улучшенные массогабаритные характеристики.
2. При работе на малых глубинах СЭП целесообразно выполнять на постоянном токе: нет необходимости в компенсации емкостной составляющей тока кабель-троса и установки дополнительных линейных дросселей. Это улучшает массогабаритные и стоимостные показатели системы электропитания и ликвидирует проблемы, связанные с выбором высоковольтной элементной базы для построения подводной части системы электропитания и её настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.
2. Ястребов В.С. и др. Электроэнергетические установки подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1987. – 123 с.
3. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 5. – С. 120–123.
4. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Советское радио, 1971. – 720 с.
5. http://www.vectorcable.com

УДК 621.321.6